

С.В.КИПРИЧ; А.А.ПЕТКОВ, канд. техн. наук;
Д.Г.КОЛИУШКО, канд. техн. наук; НТУ "ХПИ"

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАЩИЩЕННОСТИ СИСТЕМЫ ОБЪЕКТОВ ГРУППОЙ ОДИНОЧНЫХ СТЕРЖНЕВЫХ МОЛНИЕОТВОДОВ В СРЕДЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ТАБЛИЦ

У статті представлені методика аналізу та програми для оцінки захищеності системи об'єктів блискавководводами стержневого типу.

In article the technique of the analysis and the program for an estimation of system of objects protectability by rod type lightning-conductors is represented.

Постановка проблемы. Обеспечение молниезащиты при проектировании зданий и сооружений является в настоящее время исключительно важной задачей в силу применения дорогостоящего оборудования, нарушение нормального функционирования которого, по причине удара молнии, сопровождается значительным материальным ущербом. Кроме того, эта задача становится все более актуальной из-за широкого применения компьютерной техники, которая чувствительна к помехам, возникающим при разряде и в момент протекания токов молнии.

Анализ публикаций. Важность рассматриваемой проблемы нашла свое отражение в национальных и международных нормативных документах [1, 2], регламентирующих методику построения молниезащиты зданий и сооружений, а также в разработке программных продуктов для анализа молниезащиты [3-6].

Программный комплекс, рассмотренный в [3], имеет графический интерфейс для ввода топологии объектов и молниеотводов (МО), а также позволяет представить и зоны защиты этими МО в трехмерном виде. Анализ защищенности объектов представляется в графическом виде. Также программный комплекс позволяет решить задачу синтеза для одиночного стержневого МО.

Экспертная система (ЭС), рассмотренная в [4], позволяет проводить оценку молниезащищенности зданий и сооружений с выдачей рекомендаций по ее повышению, однако эта задача решается только для одного здания или сооружения одним МО. Также ЭС не позволяет автоматически минимизировать высоту одиночного стержневого МО, защищающего объект.

На сайте [5] размещена программа, которая состоит из двух подсистем и предназначена для автоматизированного проектирования молниезащиты и заземления зданий и сооружений. Она позволяет визуализировать объекты и зону их защиты различными типами МО в трехмерном виде.

Построение зон защиты осуществляется только с использованием методики РД 34.21.122-87 [1].

В [6] представлен комплекс программ, одной из которых является программа "PROTECTION ZONES", которая предназначена для анализа и проектирования устройств молниезащиты. Она, как и [3], обладает графическим интерфейсом и по построенной расчетной схеме позволяет производить расчет системы молниезащиты по одной из трех методик: РД 34.21.122-87 [1], Энергосетьпроекта (применяется только на территории России), международного стандарта МЭК 61024 [2]. В качестве недостатков программы следует отметить отсутствие возможности построения зданий произвольной формы, а также синтеза системы молниезащиты.

Как видно из проведенного анализа, разработанные программные продукты обладают теми или иными недостатками, не позволяющими в полной мере производить необходимые расчеты при анализе и синтезе молниезащиты.

Целью настоящей статьи является разработка методики анализа молниезащищенности системы объектов МО стержневого типа и определение минимальной высоты одиночного стержневого МО, защищающего эту систему, в среде электронных таблиц.

Материалы и результаты исследования. Практика проведения расчетов молниезащищенности показывает необходимость решения ряда задач, постановка и методика решения которых приведены ниже:

1) определение высоты зоны защиты над точкой, расположенной в плоскости грунта, при заданных параметрах молниезащиты (надежность защиты, количество, высота и координаты МО).

Для одиночного стержневого МО высота зоны защиты представляет собой функцию $Z = f(V; Pz; XP; YP; H_{MO}; X_t; Y_t)$, где V – параметр, характеризующий способ построения зоны защиты; Pz – параметр, характеризующий надежность защиты; XP, YP – координаты расположения МО в плоскости грунта; H_{MO} – высота МО; X_t, Y_t – координаты точки в плоскости грунта, над которой вычисляется высота зоны защиты. Определение высоты зоны защиты, создаваемой одиночным стержневым МО может производиться по соотношениям, приведенным в [7]. Для варианта, когда молниезащита осуществляется несколькими МО, высота зоны защиты над рассматриваемой точкой определяется как максимальное значение из вычисленных высот зон защиты, создаваемых каждым МО:

$$Z = \max(Z_i), \quad (1)$$

где $Z_i = f(V; Pz; XP_i; YP_i; H_{MO_i}; X_0; Y_0)$ – высота зоны защиты, создаваемой i -м МО.

2) определение защищенности системы объектов одиночным стержневым МО.

Каждый объект, по критерию молниезащиты может быть защищен либо не защищен, что позволяет для удобства дальнейшего анализа ввести индикатор защиты объекта A_t , который определим как:

$$A_t = \begin{cases} 1, & \text{в случае защищенности объекта;} \\ 0, & \text{в случае незащищенности объекта.} \end{cases} \quad (2)$$

Объект является защищенным, если высота зоны защиты (Z) над всеми точками объекта больше, чем высота объекта (Z_t) в этих точках ($Z > Z_t$).

Тогда для системы из n объектов можем ввести индикатор защиты системы объектов A_c , который определим как:

$$A_c = \bigwedge_{i=1}^n A_{t_i} = \begin{cases} 1, & \text{в случае защищенности системы объектов;} \\ 0, & \text{в случае незащищенности системы объектов,} \end{cases} \quad (3)$$

где A_{t_i} – индикатор защиты i -го объекта одиночным стержневым МО;

$\bigwedge_{i=1}^n$ – логический оператор "И" [8], осуществляющий логическое умножение индикаторов A_{t_i} всех объектов.

Система объектов является защищенной, если для каждого объекта высота зоны защиты над ним больше, чем высота этого объекта (т. е. индикаторы A_{t_i} для всех объектов принимают значения 1), и незащищенной – если хотя бы один объект не защищен (т. е. хотя бы один индикатор A_{t_i} принимает значение 0).

3) определение минимальной высоты одиночного стержневого МО, защищающего систему объектов.

При проектировании молниезащиты важно не только проанализировать защищенность системы объектов от поражения молнией, но (с экономической и технологической точки зрения) и вычислить минимальную высоту МО, защищающего эту систему или убедиться в том, что система не может быть защищена МО с заданными координатами.

Данная задача решается численными методами [9]. Для определения минимальной высоты МО можно использовать, например, метод пошагового приращения, начиная с высоты самого высокого объекта. Величина шага определяется необходимой точностью расчета. На первом этапе (при высоте МО, равной высоте наивысшего объекта) система не будет защищена, вследствие чего индикатор защиты системы объектов $A_c = 0$. При последующих вычислениях на каждом шаге определяется защищенность системы объектов, и как только индикатор A_c примет значение 1, высота МО на этом шаге и будет минимально возможной. При этом изменение высоты МО осуществляется

до предельного значения, зависящего от параметра, характеризующего надежность защиты [7].

4) определение защищенности системы объектов группой одиночных стержневых МО.

Аналогично приведенным выше выражениям, можем ввести индикатор защиты для системы из n объектов, защищаемой группой из m одиночных стержневых МО:

$$A_c = \bigwedge_{i=1}^n \bigvee_{j=1}^m A_{t_{i,j}} = \begin{cases} 1, & \text{в случае защищенности системы объектов;} \\ 0, & \text{в случае незащищенности системы объектов,} \end{cases} \quad (4)$$

где $\bigvee_{j=1}^m$ – логический оператор "ИЛИ" [8], осуществляющий логическое сложение индикаторов защиты объекта группой из m одиночных стержневых МО;

$A_{t_{i,j}}$ – индикатор защиты i -го объекта j -м МО.

Система объектов является защищенной группой МО, если каждый объект защищен хотя бы одним МО (т. е. логическая сумма $\bigvee_{j=1}^m A_{t_{i,j}}$ для каждого из объектов принимает значение 1), и незащищенной, если хотя бы один объект не защищен ни одним МО (т. е. логическая сумма $\bigvee_{j=1}^m A_{t_{i,j}}$ хотя бы для одного объекта принимает значение 0).

Для реализации описанных алгоритмов расчета молниезащищенности были разработаны программы с использованием Microsoft Excel в среде электронных таблиц (ЭТ) [10].

Для решения первых трех задач (определения высоты зоны защиты, защищенности системы объектов одиночным стержневым МО и определения минимальной высоты одиночного стержневого МО, защищающего эту систему) может быть использована программа, интерфейс которой для системы из 10 объектов-стержней (методика замены реальных объектов набором объектов-стержней описана в [7]) показан на рис. 1. Исходные данные для программы вводятся в следующие ячейки:

- надежность защиты (P_z) – в ячейку B9;
- координаты расположения МО в плоскости грунта и его высота (X_P , Y_P и H) – вводятся в ячейки D9, E9 и C9 соответственно.
- координаты расположения каждого объекта-стержня в плоскости грунта и его высота (X_t , Y_t и Z_t) – вводятся в ячейки столбцов B, C и D, начиная с B23, C23 и D23 соответственно.
- интервал строк, определяемый начальным (вводится в ячейку C14) и конечным (вводится в ячейку C15) значениями для изменения количества объектов системы.

	A	B	C	D	E	F	G
	Защита системы объектов одним стержневым молниеотводом.						
1							
2		(Вариант конической зоны защиты)					
3							
4							
5		ХАРАКТЕРИСТИКА МОЛНИЕЗАЩИТЫ					
6							
7		Надежность	Высота МО	Координаты МО			
8		Pz	H	XP	YP		
9		0.95	119.7	12	-5		
10							
11							
12		Интервал строк, в котором заключены данные об объектах системы					
13							
14		номер начальной строки:	23				
15		номер конечной строки:	32				
16							
17		Индикатор защиты системы, Ас	Высота наивысшего объекта, Ннач	Шаг, ΔН	Молниеотвод минимальной высоты		
18		1	101	0.1			
19							
20							
21		№ п/п объекта-стержня	Координаты объекта-стержня			Высота зоны	Индикатор защиты объекта-стержня
22			Xт	Yт	Zт	Z	Ат
23		1	1	1	50	102.439	1
24		2	2	2	49	102.637	1
25		3	3	3	4	102.738	1
26		4	4	4	34	102.738	1
27		5	5	8	101	101.068	1
28		6	2	4	1	101.872	1
29		7	4	20	40	94.025	1
30		8	7	-1	97	106.197	1
31		9	17.6	-5	13	106.689	1
32		10	10	33	22	86.785	1
33							

Рис. 1. Интерфейс программы расчета для определения одиночного стержневого МО минимальной высоты, защищающего систему из 10 объектов-стержней.

После ввода исходных данных программа сразу выдает результат вычисления:

1) высоты зоны защиты в точках расположения объектов (на рис. 1 в ячейках E23 – E32), вычисление которой осуществляется при помощи запрограммированной на языке Visual Basic for Application (VBA) функции (рис. 1, Z) –

$$= \text{А} \hat{\text{u}} \hat{\text{n}} \hat{\text{i}} \hat{\text{o}} \hat{\text{a}} _ \text{C} \text{C} _ \text{N} \hat{\text{o}} \hat{\text{o}} \hat{\text{I}} \hat{\text{I}} _ \hat{\text{e}} \hat{\text{i}} \hat{\text{e}} \hat{\text{a}} \hat{\text{n}} \hat{\text{e}} \hat{\text{i}} \hat{\text{a}} _ \hat{\text{i}} _ \hat{\text{o}} \hat{\text{e}} \hat{\text{i}} \hat{\text{a}} (Pz, H, XP, YP, X\hat{o}, Y\hat{o}). \quad (5)$$

Выражение (5) согласно терминологии Excel [10] является функцией из категории *Определенные пользователем*. Эта функция производит расчеты высоты зоны защиты конического типа согласно соотношений, приведенных в [7].

Надежность защиты может принимать значения 0,9; 0,95; 0,99; 0,995; 0,999. Если значение параметра не соответствует этому ряду, то функция возвращает сообщение "ОШИБКА Pz". Если заданная величина высоты МО выходит за диапазон допустимых высот МО, определяемых значением Pz [7], то функция возвращает сообщение "ОШИБКА H".

2) индикатора защиты каждого объекта-стержня одиночным стержневым МО (рис.1, Ат) –

$$= \text{А} \hat{\text{N}} \hat{\text{E}} \hat{\text{E}} (Z - Z_t > 0; 1; 0). \quad (6)$$

Выражение (6) представляет собой условную функцию программы Excel, первый аргумент которой выражает условие, второй – значение функции при истинности условия и третий – значение в случае ложности условия.

3) индикатора защиты системы объектов-стержней одиночным стержневым МО, который при известных значениях индикаторов защиты объектов определяется при помощи запрограммированной на языке VBA функции (рис. 1, Ас) –

$$= \text{ind}(N, K, \text{STOLB}, R). \quad (7)$$

Выражение (7) также является функцией из категории *Определенные пользователем* [10]. В качестве параметров этой функции используются:

– N – номер начальной строки, в которой находятся данные по первому объекту (вводится в ячейку C14);

– K – номер конечной строки, в которой находятся данные по последнему объекту (вводится в ячейку C15);

– STOLB – заголовок столбца со значениями индикаторов защиты объектов (столбец F);

– R – интервал ячеек, в которых находятся значения индикаторов защиты объектов (необходимо выделить ячейки F23-F32).

В ячейке A18 отражается результат определения индикатора защиты системы объектов-стержней.

Определение минимальной высоты одиночного стержневого молниеотвода осуществляется после нажатия кнопки **"Молниеотвод минимальной высоты"**. Нажатие на кнопку запускает программу, после выполнения которой в ячейке C9 (см. рис. 1) появляется значение минимальной высоты оди-

ночного стержневого МО с заданными координатами, который защищает систему объектов. Для работы программы необходимо ввести следующие исходные данные:

- шаг (ΔH) – вводится в ячейку C18 ЭТ;
- координаты объектов-стержней и их высота (X_t , Y_t и Z_t) – вводятся в ячейки B23 – B32, C23 – C32 и D23 – D32 соответственно.

Высота наивысшего объекта ($H_{нач}$), с которой начинается расчет, определяется функцией MAX (D23:D32) (рис. 1, ячейка B18 ЭТ). Это выражение возвращает максимальное значение из списка аргументов (высот объектов-стержней Z_t).

Если даже при максимально возможной высоте МО [7] система объектов не защищена, то программа возвращает сообщение "Предел высоты".

Для определения защищенности системы объектов группой одиночных стержневых МО была разработана программа с использованием Microsoft Excel, интерфейс которой представлен на рис. 2.

Защищенность системы объектов группой МО также определяется значениями индикаторов защиты объектов и системы.

Расчет реализован на двух листах, на одном из которых показаны все исходные данные и результаты расчетов (см. рис. 2), а на втором – промежуточные вычисления (см. рис. 3).

	A	B	C	D	E	F
1	Защита системы объектов группой стержневых молниеотводов.					
2	(Вариант конической зоны защиты)					
3						
4						
5	ХАРАКТЕРИСТИКА МОЛНИЕЗАЩИТЫ					
6						
7		Надежность, Pz	0,9			
8						
9	Интервал строк, в котором заключены данные о молниеотводах					
10						
11	номер начальной строки:		17			
12	номер конечной строки:		23			
13						
14		Характеристики молниеотвода				
15	№ молниеотвода	координаты расположения		высота		
16		ХР	УР	Н		
17	1	1	1	50		
18	2	2	2	43		
19	3	3	3	67		
20	4	4	4	99		
21	5	5	8	86		
22	6	2	4	146		
23	7	4	20	74		
24						
52	ХАРАКТЕРИСТИКА СИСТЕМЫ ОБЪЕКТОВ					
53						
54	Интервал строк, в котором заключены данные об объектах системы					
55						
56	номер начальной строки:		65			
57	номер конечной строки:		74			
58						
59	Индикатор защиты системы, Ас					
60	1					
61						
62						
63	№ объекта-стержня	Координаты объекта-стержня			Индикатор защиты объекта-стержня	
64		Хт	Ут	Zt	Ат	
65	1	1	1	17	1	
66	2	2	2	46	1	
67	3	3	3	23	1	
68	4	4	4	5	1	
69	5	5	8	12	1	
70	6	2	4	9	1	
71	7	4	20	18	1	
72	8	7	-1	27	1	
73	9	17,6	-5	101	1	
74	10	1	33	13	1	

Рис. 2. Интерфейс программы расчета для определения защищенности системы из 10 объектов группой из 7 одиночных стержневых МО.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Номер объекта	Кол-во МО	Индикатор Ат	Номер молниеотвода						
2				1	2	3	4	5	6	7
3	1	7	1	1	1	1	1	1	1	1
4	2	5	1	0	0	1	1	1	1	1
5	3	7	1	1	1	1	1	1	1	1
6	4	7	1	1	1	1	1	1	1	1
7	5	7	1	1	1	1	1	1	1	1
8	6	7	1	1	1	1	1	1	1	1
9	7	7	1	1	1	1	1	1	1	1
10	8	7	1	1	1	1	1	1	1	1
11	9	1	1	0	0	0	0	0	1	0
12	10	7	1	1	1	1	1	1	1	1
13										

Рис. 3. Вид таблицы промежуточных вычислений для определения защищенности системы из 10 объектов каждым из 7 одиночных стержневых МО и группой в целом.

Для расчета необходимо ввести данные, характеризующие систему молниезащиты и систему объектов (см. рис. 2). В качестве характеристики молниезащиты выступают следующие параметры:

- надежность защиты (Pz) – вводится в ячейку C7;
- МО группы – вводятся в ячейки A17 – A23;
- координаты расположения каждого МО и его высота (Xp, Yp и H) – вводятся в ячейки B17 – B23, C17 – C23 и D17 – D23 соответственно;
- интервал строк, определяемый начальным (вводится в ячейку C11) и конечным (вводится в ячейку C12) значениями для изменения количества МО группы.

В качестве характеристики системы объектов выступают такие параметры:

- объекты-стержни – вводятся в ячейки A65 – A74;
- координаты каждого объекта-стержня и его высота (Xt, Yt и Zt) – вводятся в ячейки B65 – B74, C65 – C74 и D65 – D74 соответственно;
- интервал строк, определяемый начальным (вводится в ячейку C56) и конечным (вводится в ячейку C57) значениями для изменения количества объектов системы.

Значения индикаторов защиты объектов Ат (см. рис. 3) определяются с помощью функций, приведенных выше, используя выражения (2) и (6). Для определения результирующего значения индикатора необходимо знать значения индикаторов защиты каждого объекта каждым МО из группы, которые выдаются в ячейках D3 – J12.

Результирующие значения индикаторов защиты объектов Ат из ячеек C3 – C12 (см. рис. 3) передаются в ячейки E65 – E74 (см. рис. 2), а затем, используя выражения (4) и (7), определяется индикатор защиты системы объектов в целом (Ac), значение которого отражается в ячейке A60 (см. рис. 2).

Выводы.

1. Предложена методика определения защищенности системы объектов группой одиночных стержневых молниеотводов с использованием аппарата булевой алгебры.

2. Разработана программная реализация методики расчета минимальной высоты одиночного стержневого молниеотвода, защищающего систему объектов-стержней с использованием среды электронных таблиц Microsoft Excel.

3. Разработана программа анализа защищенности системы объектов-стержней группой одиночных стержневых молниеотводов.

4. Приведены примеры расчета минимальной высоты молниеотвода для защиты 10 объектов, а также определения защищенности системы объектов группой из 7 одиночных стержневых молниеотводов.

Результаты статьи могут использоваться для решения задачи оптимального проектирования молниезащиты.

Список литературы: 1. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений (РД 34.21.122-87). М.: Энергоатомиздат, 1989. – 56 с. 2. IEC standard 61024-1-1 (1993 г.). Protection of structures against lightning. Part 1: General principles. Section 1: Guide A – Selection of protection levels for lightning protection systems. 3. Колиушко Д.Г., Обруч И.В., Петков А.А. Программный комплекс для расчетов молниезащиты зданий и сооружений // Физические и компьютерные технологии // Труды 11-й Международной научно-технической конференции. – Харьков: ХНПК "ФЭД", 2005. – С. 344-347. 4. Серков А.А., Толкачев М.Ю. Разработка экспертной системы для оценки молниезащиты зданий и сооружений // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Електроенергетика і перетворююча техніка. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2004. – №5. – С. 16-23. 5. Салин А., Серов В., Третьяков С. Автоматизация расчета молниезащиты и заземления в среде ElectricStorm. – http://www.cadmaster.ru/articles/23_electrics_storm.cfm 6. Борисов Р.К., Петров С.Р. Компьютерные программы для анализа и проектирования устройств заземления и молниезащиты // Первая Российская конференция по заземляющим устройствам: Сборник докладов / Под ред. Ю.В. Целебровского. – Новосибирск: Сибирская энергетическая академия, 2002. – С. 41-43. 7. Петков А.А., Колиушко Д.Г., Колиушко Г.М. Выбор оптимальных параметров одиночного стержневого молниеотвода // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Електроенергетика і перетворююча техніка. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2004. – №35. – С. 64-71. 8. Хилбурн Дж., Джулич П. Микро-ЭВМ и микропроцессоры: Пер. с англ. – М.: Мир, 1979. – 464 с. 9. Дьяконов В.П. Справочник по алгоритмам и программам на языке бейсик для персональных ЭВМ. – М.: Наука, 1989. – 240 с. 10. Коттингхэм М. Excel 2000: Руководство разработчика: Пер. с англ. – К.: BHV, 2000. – 704 с.

Поступила в редакцию 12.05.06.